

ダム基礎の透水性とルジオン値

PERMEABILITY AND LUGEON VALUES OF DAM FOUNDATIONS

山口嘉一*・松本徳久**

By Yoshikazu YAMAGUCHI and Norihisa MATSUMOTO

In surveying the permeability of dam foundations, Lugeon water test is usually adopted and the permeability is evaluated by Lugeon value (Lu). The curve between pressure and rate of water injection (p - q curve) is drawn by using the test results and Lugeon value is obtained from the slope of straight line part of p - q curve. However, quite a few p - q curves which have various shapes except the straight line, are obtained when Lugeon water tests are performed at fields. Therefore, in order to interpret the results of Lugeon water tests accurately the authors performs the following things : (1) p - q curves obtained from Lugeon water tests are classified into several categories, (2) causes of several p - q curves classified in (1) are summarized, (3) the methods to determine the accurate Lugeon value from each p - q curve are illustrated.

Keywords : Lugeon water test, p - q curve, Lugeon value, seepage analysis

1. はじめに

ダムの設計において、基礎地盤の透水性を把握することは非常に重要な課題の1つである。ダム基礎地盤に対する原位置透水試験法としては、一般にボーリング孔を利用するルジオンテストが用いられている。なお、透水性は、試験孔に数段階の圧力で注水し、各段階ごとの有効注入圧力 p と試験区間長 1 m 当たりの注入量 q から注入圧力-注入量曲線（以下、 p - q 曲線と称す）を描き、それに直線関係があることを確認した後で注入圧力 10 kgf/cm² 時の試験区間長 1 m 当たりの注入量 (l/min/m) として表現されるルジオン値 Lu によって評価される。

この試験法には、「ルジオンテスト技術指針・同解説」¹⁾（以後、技術指針と称す）という指針があり、おのおのダム基礎の透水性を統一された試験方法により調査する方向が目差されている。このように同一の試験方法により得られた結果を蓄積することは、今後のダム基礎の透水性調査に大いに役立つものである。しかし、このような同一の試験方法に従ってルジオンテストを

施した場合でも、亀裂の少ない硬岩地盤では結果の解析に際して問題が発生する可能性は少ないが、亀裂が発達した硬岩地盤や岩自体の変形性が大きい軟岩あるいは砂礫地盤では、結果として得られる p - q 曲線には直線関係がないものや、昇圧段階と降圧段階では異なった経路を通るものもかなり含まれており、ルジオン値の決定が困難になることがしばしば見受けられる。菅原²⁾が、技術指針が出された後、数種類の p - q 曲線を多くの技術者に与えて算出されたルジオン値は、技術者の経験年数によらずかなりばらついていたという結果は、上記のことを端的に表わした例である。この試験方法は、Lugeon³⁾が1933年に提唱して以来、基準注入圧力 10 kgf/cm² 時にどの程度の注入量になるかを測定する定性的なインデックス試験の性格が強い。しかし、ルジオンテストの結果得られる p - q 曲線は地盤の水理特性の反映であり、適切な解析を行うことにより多くの情報が得られる可能性がある。そこで本論文においては、種々の形状の p - q 曲線の発生する原因を分析するとともに、いかにダム湛水後の基礎浸透流を支配する透水性を表わすルジオン値を決定すればよいかを検討する。このルジオン値は、もはや従来の定性的な透水性の指標とみなされているものではなく定量的な指標になるものである。さらに、ルジオンテストを注水式の定水位透水試験と考

* 正会員 建設省土木研究所フィルダム研究室研究員
(〒305 茨城県つくば市大字旭一番地)

** 正会員 工博 建設省土木研究所フィルダム研究室室長
(同上)

ここに、 $k(\theta)$ は透水係数テンソル、 ψ は圧力水頭、 θ は体積含水率、 $C(\theta) (= \partial\theta/\partial\psi)$ は比水分容量、 S_0 は比貯留係数、 z は鉛直座標、 t は時間である。

浸透流解析用の解析モデルは、Fig. 4 に示す軸対称モデルである。なお、モデル化の範囲は試験孔からの注水に対してモデルがほぼ無限の広がりをもつ透水性媒体とみなせる程度とした⁷⁾。

また、浸透流解析の実施に際し、何も言及しない場合には、モデル解析ということも考慮して以下の仮定を満足するものとする。

- ① 飽和時の透水係数 k_0 は 1.0×10^{-4} cm/s (10 Lu 程度) とする。
- ② 比貯留係数 S_0 は 1.0×10^{-7} cm⁻¹ とする。
- ③ 間隙率 n は 0.2 とし、最小含水量 (土の吸着水のように浸透流によって移動し得ない体積含水率の値) θ_r を 0.0、有効体積含水率 (土の間隙比からエントラプト・エアなどの空気の占める割合を除いた値) θ_e を間隙率と同じ 0.2 とする。
- ④ 不飽和特性のうち、不飽和透水係数を飽和透水係数で除した比透水係数 K_r と体積含水率 θ の関係を表わす関数として Irmay の提案式⁸⁾ を採用する。
- ⑤ 不飽和特性のうち、体積含水率 θ と負の圧力水頭 ψ の関係を表わす水分保持曲線は、湿潤過程と排水過程の間のヒステリシスを考慮しない。
- ⑥ 水分保持曲線は $(\theta=0.2, \psi=-0.0 \text{ m})$ 、 $(\theta=1.0 \times 10^{-6}, \psi=\psi_0)$ 、 $(\theta=0.0, \psi=-17.5 \text{ m})$ を結ぶ折線で表わし、 $\theta=1.0 \times 10^{-6}$ における圧力水頭 ψ_0 を -1 m とする。

以上③から⑥の仮定に基づく不飽和特性曲線を Fig. 5 に示す。

4. p - q 曲線の分類

ルジオンテストの結果の解析方法についてまとめる前

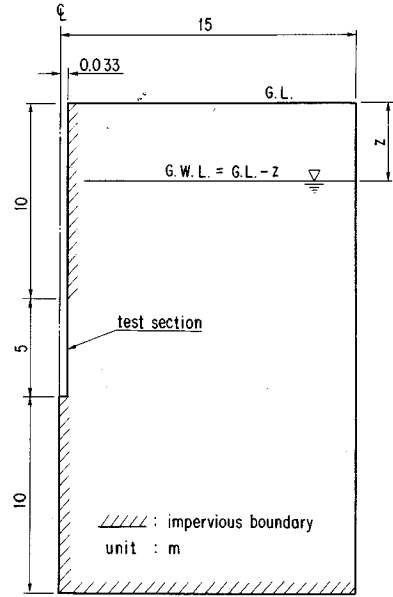


Fig. 4 Analytical model.

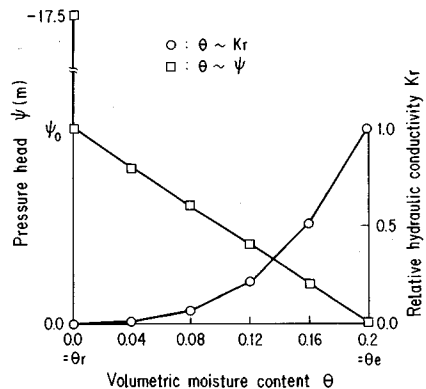


Fig. 5 Unsaturated properties.

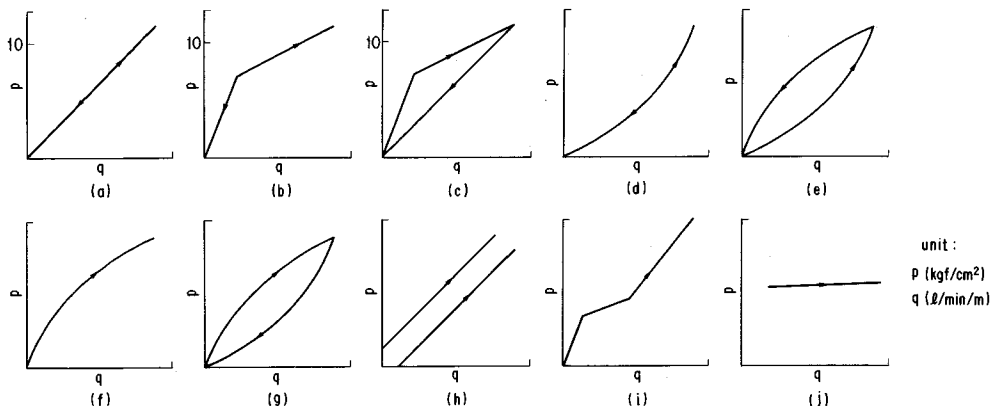


Fig. 6 Patterns of p - q curves.

unit :
 p (kgf/cm²)
 q (l/min/m)

に、 p - q 曲線をその形状に応じて Fig. 6 に示すように分類する。また、以下では、各形状の p - q 曲線の発生原因をとりまとめ、その影響度を検討し、最終的にはダム湛水に伴う基礎浸透流を支配する透水性を表現するルジオン値をいかに求めるかを示す。

5. 原点を通る直線型 p - q 曲線

(1) 限界圧力が認められない場合

これは、Fig. 6 (a) に示すように昇圧段階と降圧段階で全く同路をたどる原点を通る直線より成り、かつ途中で限界圧力が認められない p - q 曲線である。この型の p - q 曲線は、試験対象地盤の種類にかかわらず、注水時の地盤変形はなく試験孔からの水の流れが層流であることにより得られるもので、ルジオン値はこの直線より求めればよく、何ら問題はない。なぜならば、ダムの湛水に伴い基礎地盤中に発生する浸透流の動水勾配はかなり小さく、水は層流かそれに近い状態で流れているからである。このことは、末吉・大村⁹⁾ が節理性岩盤モデルによる解析で、松本・山口¹⁰⁾ が多孔質媒体モデルによる解析で明らかにしている。

(2) 限界圧力が認められた場合

これは、Fig. 6 (b), (c) に示すように限界圧力が有効注入圧力 10 kgf/cm^2 以下で認められるものの昇圧段階の限界圧力以下が原点を通る直線となっている p - q 曲線である。なお、限界圧力が有効注入圧力 10 kgf/cm^2 以上である場合は、昇圧段階のみに着目して (1) に属するものとする。

この型の p - q 曲線においても (1) と同様の理由から限界圧力以下の直線部を外挿することにより換算ルジオン値を求めればよい。限界圧力以上の p - q 曲線からルジオン値を求めると透水性の過大評価になる。ダム湛水に伴う基礎の浸透破壊については別途厳密な評価を行わなければならないが、よほど限界圧力が小さくない限り限界圧力以下の p - q 曲線から求めたルジオン値が真の透水性を表わしていると考えても問題はない。限界圧力は急激な注入量の増加により認定することができるが、この原因は、有効注入圧力の増加に伴う試験区周辺地盤における既存の水みちの拡大あるいは新しい水みちの形成にある。しかし、明瞭な屈曲点が認められた p - q 曲線には、昇降圧段階同路のもの (Fig. 6 (b) 参照) と異路のもの (Fig. 6 (c) 参照) が存在する。前者の場合、地盤の破壊には至っていないと考えられるが、技術指針でも示しているとおり、透水性の屈曲点という解釈でこの点において限界圧力を決定する。

なお、ルジオンテストの結果の解析以前の問題として、遮水用パッカと孔壁のなじみが悪いパッカと孔壁の境界部から漏水が発生したり、パッカ長が十分でないた

め注入水がパッカ直上部の孔内に吹き出したりして、地盤の真の透水性や限界圧力を把握できないことがあるので注意を要す。

6. 逐次流量減少型 p - q 曲線

(1) 発生原因

これは、Fig. 6 (d), (e) に示すように昇圧段階における初期接線勾配直線に比べて流量が逐次減少傾向にある p - q 曲線のことで、昇降圧段階同路のもの (Fig. 6 (d) 参照) と昇降圧段階異路のもの (Fig. 6 (e) 参照) に分類できる。なお、昇降圧段階異路のものは、同じ注入圧力であれば昇圧段階の注入量の方が降圧段階のそれよりも大きいと考える。この型の p - q 曲線が発生する原因を以下にまとめる。

(昇降圧段階同路)

- ① 試験孔から地盤への水の流れが乱流である場合。
- ② 注入管内抵抗に伴う損失水頭 h_s による有効注入圧力の補正を行っていないか、行っても損失水頭 h_s を過小評価している場合。
- ③ 地下水面下の試験において、注水に伴い地下水面が上昇するため有効注入圧力が減少し、 p - q 曲線が直線関係からずれる場合。ただし、この場合の p - q 曲線が必ずしも逐次流量減少型になるとは限らず、逐次流量増加型 (7. 参照) になる可能性もある。この点については、以下で詳しく検討する。
- ④ 地下水面上の試験においては、地盤中に注入された水がポテンシャル流ではなく重力流であること、地盤の不飽和特性等の影響により直線型 p - q 曲線が得られない場合。この点についても以下で詳しく検討する。

(昇降圧段階異路)

- ① 試験孔掘削時に発生するスライムの洗浄不足や試験水中の浮遊物により試験孔周辺地盤の目詰りが助長される場合。
- ② ある圧力段階における水の流れが定常にならないうちに次の圧力段階に移行する場合。

(2) 昇降圧段階同路の場合の詳細検討

a) 乱流の影響 ルジオンテストにおける試験孔からの水の流れは放射流となるため、試験孔周辺に大きな動水勾配が発生する。よって、亀裂性岩盤や粒径の大きい礫層地盤における試験では、注入された水の流れが層流ではなく流水抵抗の大きい乱流となる。そのため、同注入圧力でも層流を想定した場合よりも注入量が小さくなり、かつその傾向は注入圧力が大きくなればなるほど強くなる。しかし、昇降圧段階での差はない。その結果、逐次流量減少型で昇降圧段階同路の p - q 曲線が得られる。このルジオンテストにおける乱流現象の存在は、

Kutzner¹¹⁾, Ewert¹²⁾, Houlshy¹³⁾, Lancaster-Jones¹⁴⁾らによっても指摘されている。

一方、ダム湛水に伴う基礎地盤内の浸透流は、前述したとおり、層流あるいはそれに近い流れである。よって、ルジオンテストの結果に乱流の影響が及ぶ可能性のある地盤では、高粘性流体を用いて試験を行う^{15),16)}か、水によりきわめて低圧力下での試験を行うことにより層流状態を達成したうえでルジオン値を決定することが望まれる。さらに、地質状況をよく観察し、ダム湛水に伴う基礎地盤内の浸透状況も併せて推論しておくことも重要となつてこよう。

なお、層流状態のルジオン値を得る対策のうち前者の高粘性流体を用いる方法では粘性の増加が、流れの状況を決定する無次元量であるレイノルズ数の低下に2乗の効果があるのに対して、後者のきわめて低圧力の水を用いる方法では注入圧力低下のレイノルズ数低下に与える効果は1乗でしかない¹⁷⁾。このことは、松本・山口ら¹⁸⁾の現場実験においても明らかとなっている。よって、乱流が発生しやすい高透水性地盤では、高粘性流体を用いた方が層流状態の実現が容易である。

b) 損失水頭の影響 注入管内抵抗による損失水頭 h_3 の補正の有無が有効注入圧力測定精度に大きな影響を与えることは、多くの研究者によって指摘されており^{11),18)}、技術指針の中でも補正の必要性を明記している。また、 h_3 が注入量の2乗に比例することもあり損失水頭の無補正は逐次流量減少型の $p-q$ 曲線の発生の原因となる。いま、損失水頭の無補正が得られるルジオン値の精度に与える影響を試算してみる。有効注入圧力 10 kgf/cm² で注水した際、損失水頭を補正した場合としない場合で得られるルジオン値の誤差が β 以下となる条件は、式 (1)~(4) より次式として求めることができる。なお、得られるルジオン値は、明らかに損失水頭を補正しない場合の方が小さい。

$$Lu^2 L \leq 5.7 \times 10^4 \times \beta \dots \dots \dots (6)$$

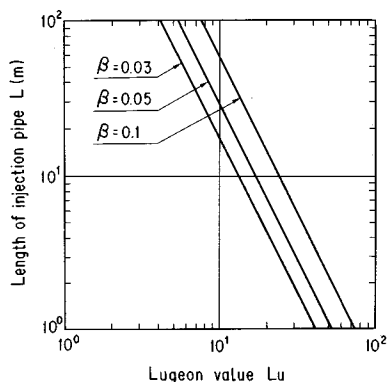


Fig. 7 Effect of head loss h_3 .

ここに、 Lu は損失水頭を補正した場合のルジオン値である。

式 (6) 中の β に 0.03, 0.05, 0.1 を代入した場合の条件式を Fig. 7 として図化した。

損失水頭を正確に知る方法には、実際に使用する注入管を用いて損失水頭に関する事前実験を行うか、試験区間に間隙水圧計を設置して水頭損失後の注入圧力を直接測定する^{11),18)}ことが挙げられる。特に、後者の方法は有用であり、最近ではかなり一般的な技術になりつつある。

損失水頭に関するその他の注意事項としては、注入管内の十分な空気抜きが挙げられる¹⁹⁾。つまり、注入管への空気の混入により、水が注入管内を満管で流れないために注入圧力や注入量のデータがばらついたり大きな管内抵抗となる。なお、この空気混入の有無を、注入管を一部アクリルパイプにすることにより目視で確認することも有効な対策の1つである。

c) 注水に伴う地下水面上昇の影響 播田・豊田¹⁸⁾は、新第三紀の堆積岩に対する地下水面下のルジオンテストにおいて、試験後の地下水位が試験前のそれよりも高くなる場合が多かったと報告している。注水に伴い地下水面が上昇する (Fig. 8 参照) と、有効注入圧力が減少し、結果的に $p-q$ 曲線の形状に何らかの影響を与えるものと考えられる。これを浸透流解析により確認する。

まず、地下水面を固定した解析と、実際の現象に合わせて地下水面の上昇を許した解析で注入量にどの程度の

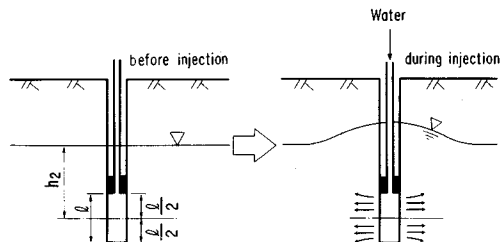


Fig. 8 Rise of ground water table due to water injection.

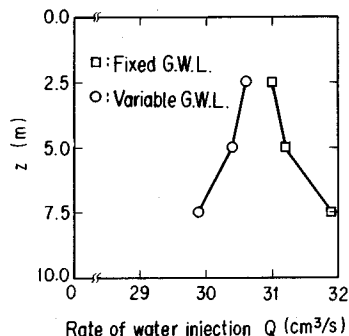


Fig. 9 Relationship between z and Q .

差が出るかを示したのが Fig. 9 である。なお、有効注入圧力 p は 0.4 kgf/cm^2 とした。この図から、前者の注入量の方が後者のそれよりも大きい、その差は最大の $z=7.5 \text{ m}$ のときで約 7% とさほど大きくない。注水前の地下水面が高いほど小さくなっていることがわかる。これは、注水に伴う地下水面の上昇が有効注入圧力減少に与える影響は、地下水面が試験区間に近いほど大きい、大きな注入量の減少をもたらすほどのものではないことを示唆している。また、浸透流解析より求めた $z=7.5 \text{ m}$ のときの p - q 曲線を Fig. 10 に示す。この図より、注水に伴う有効注入圧力低減の影響が最大である $z=7.5 \text{ m}$ のときの p - q 曲線でも原点を通る直線となっている。よって、ルジオン値を求める際の問題はないことがわかる。なお、上記浸透流解析の対象地盤は、明らかに Darcy 則の成り立つ軟岩および砂礫地盤である。一方の硬岩地盤内浸透流は亀裂の方向・分布に支配さ

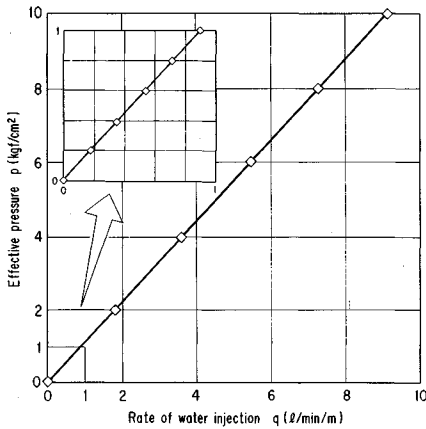


Fig. 10 p - q curve at $z=7.5 \text{ m}$.

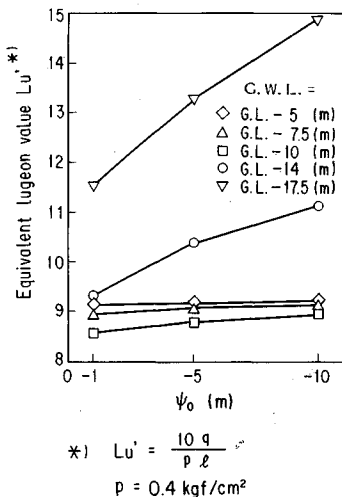


Fig. 11 Relationship between ψ_0 and Lu' .

れ、注水による試験孔周辺の地下水面の上昇量を定量的に予測することは困難である。そのため、一般的な議論は難しいが、影響度は上記の結果とさほど大きな差はないと考える。

d) 重力流および不飽和浸透の影響 地下水面上の試験では、試験孔からの水の流れが重力や地盤の不飽和特性の影響を受け、原点を通る直線型ではない p - q 曲線が得られると考える。これを浸透流解析により確認する。

まず、地下水面の位置、 p 、 ψ_0 を種々変えて解析して求めた注入量（換算ルジオン値）を Fig. 11, 12 に示す。これらの図面から、試験孔からの水の流れが重力や不飽和特性の影響をほとんど受けない地下水面下での注入量に比べ、それらの影響をかなり受ける地下水面上での注入量は大きくなる。また、その傾向は、 ψ_0 が大きいほど、 p が小さいほど、また地下水面が低くなるほど強くなる。この傾向は、Stephen and Neuman²⁰、Philip²¹ らの研究結果に一致する。

p - q 曲線の形状に着目すると、地下水面下の試験では原点を通る直線型であるのに対して、地下水面上での試験では重力や地盤の不飽和特性の影響により逐次流量減少型となる。また、ダム湛水後の基礎浸透流は明らかにポテンシャル流である。よって、基礎浸透流を支配する透水性は、ポテンシャル流が達成できる地下水面下での試験より求められるルジオン値で表現できるのであり、地下水面上の試験から得られるルジオン値はそれよりも大きい。しかし、その差は、地盤の不飽和特性（本解析では ψ_0 しか変化させていない）、注入圧力、地下水面の位置に左右されるため、ここでそれらすべてを考慮してその差を定量的に示すことは困難である。ただ、地下水面上での試験においてより真に近いルジオン値を求めるた

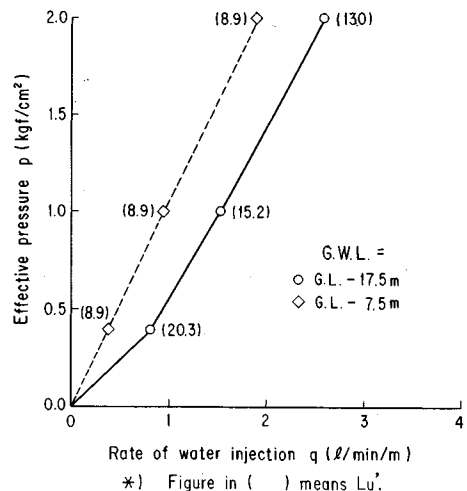


Fig. 12 p - q curves under two ground water level conditions.

めの対策としては、Fig. 12からもわかるとおり、なるべく大きい注入圧力で試験を行うほか、地盤の不飽和特性についても、今後、ダムサイトごとに検討を加えていくことが挙げられる。

(3) 昇降圧段階異路の場合の詳細検討

a) 目詰りの影響 試験孔掘削時に発生するスライムの洗浄不足や試験水中の浮遊物により試験孔周辺地盤の亀裂あるいは間隙の目詰りが助長され、試験が進むにつれて見掛け上透水性が減少するため逐次流量減少型で昇降圧段階異路の p - q 曲線が得られることがある^{11), 12)}。対策としては、試験前に十分な孔内洗浄を行ったり¹⁾、極力清浄な水を利用して試験を実施したり、注入圧力段階を減少することなどが考えられる。ただし、長時間の孔内洗浄は時間のロスになるうえ、試験対象地盤が軟岩や砂礫で構成されている場合は、長時間洗浄が地盤侵食につながる可能性もあるので注意を要する。よって、ダム基礎調査の初期段階に、対象地盤はどの程度の時間をかけて孔内洗浄を行えば、目詰りも侵食も発生しない地盤なのかを検討しておくことも1つの対策となろう²²⁾。

上記に示す対策を講じたにもかかわらず、目詰りが原因と考えられる p - q 曲線が得られた場合は、昇圧段階の初期接線勾配直線をもとにルジオン値を求めるべきで

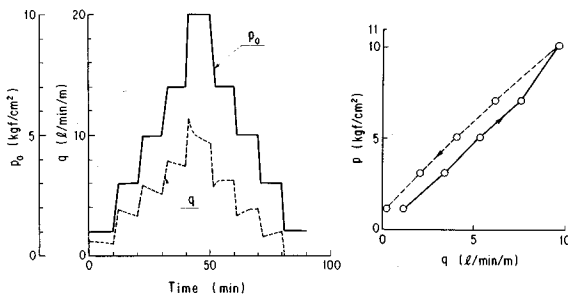


Fig. 13 p_0 and q with time and p - q curve.

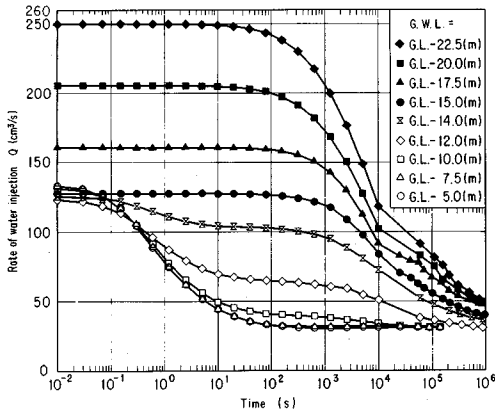


Fig. 14 Effect of ground water level ($p=0.4$ kgf/cm²).

ある。

b) 非定常の影響 透水性が小さく、貯留能力(変形性)の大きい地盤に対して試験を実施する際、技術指針に示された「注入量の測定時間は原則として5分間とするが、その間の1分ごとの注入量を測定し、変動が小さい(通常10%未満)ことを確認する必要がある」という注入量測定法に従うと、Fig. 13に示すような昇降圧段階異路の逐次流量減少型 p - q 曲線が得られる場合がある。対策としては、各圧力段階で定常注入量が得られるまで長時間注水することが挙げられる^{23), 24)}。しかし、目詰りの影響のところで示したと同様の理由から、基礎調査の初期段階において長時間のルジオンテストを実施し、どの程度の時間通水すれば目詰りの影響もなく定常注入量が得られるのか、また、通常の仕様により注入量の測定を実施した場合には真のルジオン値とはどの程度の差でルジオン値を求めることになるのかを確認しておくことが肝要となろう。なお、非定常の影響により昇降圧段階異路の逐次流量減少型 p - q 曲線が得られた場合は、Fig. 13に示した p , q の経時曲線において昇圧時

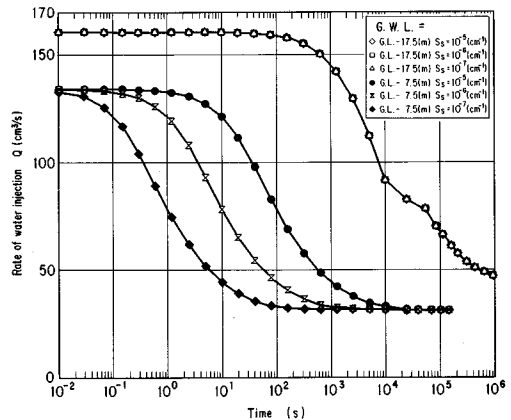


Fig. 15 Effect of S_s ($p=0.4$ kgf/cm²).

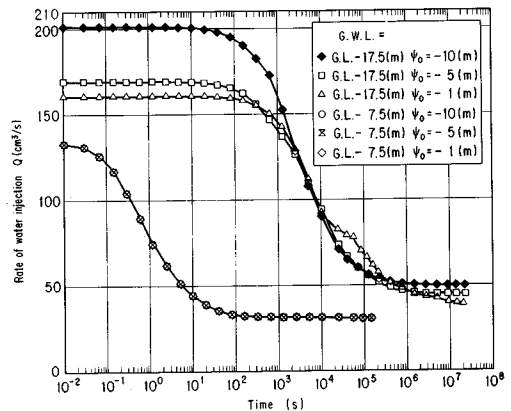


Fig. 16 Effect of ϕ_0 ($p=0.4$ kgf/cm²).

は q が逐次減少し、降圧時は逐次増加していることから判断して原点と最高注入圧力点を結んでルジオン値を求めるのがよからう。

次に、式(5)の基本方程式を参考に地下水位、比貯留係数 S_s 、 ϕ_0 を種々に変化させて非定常浸透流解析を行い定常注入量が得られるまでに要する時間を検討した。その結果を Fig. 14~16 に示す。

これらの図から、地下水面上の試験においては定常注入量が得られる時間 t は S_s が大きいほど長い、 $C(\theta)$ には全く関係なく、地下水面上の試験では $C(\theta) (= \partial\theta/\partial\phi)$ が大きいほど長い、 S_s には全く関係ない(本モデル解析において $C(\theta) \gg S_s$ である影響もあろうが)ことがわかる。また、基本方程式から、 k が小さいほど t が長くなることも容易に推察がつく。

西垣²⁵⁾ は、上記と同様の計算を行い、 t と S_s 、 k の関係を次式として示している。

$$t = 60\,000 (S_s/k) \text{ (s)} \dots\dots\dots (7)$$

今回の解析結果に対しても上式はほぼ成立する。また、地下水面上の試験においても、今回の解析では、 $C(\theta) \gg S_s$ ということもあり(ただし、実地盤を考えた場合極端におかしい設定ではない)、式(7)の S_s を $C(\theta)$ に置換した条件式がほぼ成立する。ルジオンテストを実施する前に k 、 S_s 等の係数値を知ることは困難であるが、地盤の状況などをよく観察したうえで、不飽和特性についての研究成果^{26),27)} も参考に t を概略算定しておくことも重要となる。

7. 逐次流量増加型 p - q 曲線

(1) 発生原因

これは、Fig. 6 (f)、(g) に示すように昇圧段階における初期接線勾配直線と比較して流量が逐次増加傾向にある p - q 曲線のことで、逐次流量減少型と同様に、昇降圧段階同路のもの (Fig. 6 (f) 参照) と昇降圧段階異路のもの (Fig. 6 (g) 参照) に分類できる。なお、

昇降圧段階異路のものは、同じ注入圧力であれば昇圧段階の注入量の方が降圧段階のそれよりも小さいと考えても差し支えない。この型の p - q 曲線が発生する原因を以下にまとめる。

(昇降圧段階同路)

- ① 注入管内抵抗による損失水頭 h_s を過大評価している場合。
- ② 水圧载荷に伴い地盤中の潜在亀裂を含めた亀裂が開いたり、地盤構成粒子に浮力が作用して地盤の間隙が広がるものの、水圧除荷とともに元の状態に戻る場合。

(昇降圧段階異路)

- ① 水圧载荷に伴い地盤中の潜在亀裂を含めた亀裂が開いたり、地盤構成粒子に浮力が作用して地盤の間隙が大きくなり、かつ水圧除荷によっても元の状態に戻らない場合。
- ② 水圧载荷に伴い地盤亀裂中の挟在物や地盤構成粒子が徐々に洗い流される場合。

(2) 昇降圧段階同路の場合の詳細検討

a) 損失水頭の影響 損失水頭を過大評価した場合には、過小評価あるいは無補正の場合とは逆に昇降圧段階同路の逐次流量増加型の p - q 曲線が得られる。対策は、損失水頭の過小評価あるいは無補正の場合と同じである。

b) 可逆変形の影響 ルジオンテストにおける水圧载荷に伴い地盤中の潜在亀裂も含めた亀裂が開いたり、地盤構成粒子に浮力が作用して地盤の間隙が大きくなるため水圧増加に伴い地盤の透水性が見掛け上徐々に大きくなり、結果として逐次流量増加型の p - q 曲線が得られる。ただし、地盤の変形が可逆的である範囲では、水圧除荷に伴い地盤は元の状態に戻り、昇降圧段階同路の p - q 曲線となる。

通常、この型の p - q 曲線が得られた場合は安全側ということも考慮して、原点と最高圧力点を結んだ直線よ

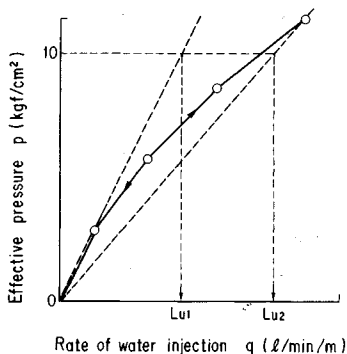


Fig. 17 Determination of Lugeon value.

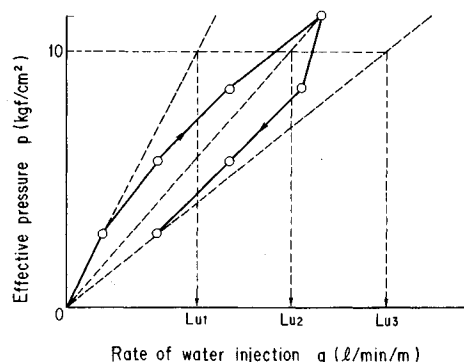


Fig. 18 Determination of Lugeon value.

りルジオン値 Lu_2 (Fig. 17 参照) を求める場合が多い。しかし、ダム湛水時には基礎地盤にルジオンテスト時のような局所的な水圧载荷がなされないうえ、堤体の上載荷重も地盤の浮き上がりを押さえる方向に作用する。よって、水圧増加に伴い逐次透水性が増加するのが亀裂中挟在物や地盤構成粒子の流亡によるのではなく可逆的な変形挙動による場合には、堤体荷重等を定量的に評価したうえで p - q 曲線の初期接線勾配直線より求まるルジオン値 Lu_1 (Fig. 17 参照) を採用することも可能となる。

(3) 昇降圧段階異路の場合の詳細検討

水圧载荷に伴い地盤中の潜在的亀裂も含めた亀裂が開いたり、地盤構成粒子に浮力が作用して地盤の間隙が大きくなり、かつ地盤変形が非可逆的である場合、あるいは、亀裂中の挟在物や地盤構成粒子が徐々に洗い流される場合に、昇降圧段階異路の逐次流量増加型の p - q 曲線が得られる。この型の p - q 曲線からは、以下の3種類の方法でルジオン値を決定することが考えられる。

- ① 昇降圧段階の初期接線勾配直線よりルジオン値 (Fig. 18 の Lu_1) を決定する方法。
- ② 原点と最高圧力点を結んだ直線よりルジオン値 (Fig. 18 の Lu_2) を決定する方法。
- ③ 原点と最終圧力点を結んだ直線より求まる最高ルジオン値 (Fig. 18 の Lu_3) を採用する方法。

ルジオンテスト孔からの水の流れが放射流であるのに対して、ダム湛水に伴う基礎浸透流はほぼ一次元流である。そのためルジオンテストにおいて発生した非可逆的な変形、地盤構成粒子の流亡がダム湛水時の基礎浸透流によっても発生するか否かを判定することは非常に困難である。よって、 Lu_1 を採用することの理由付けも困難となる。以上より、この場合は、安全側という判断も付け加えて、 Lu_2 ないし Lu_3 をルジオン値として採用しておく方が無難だといえる。

8. その他の p - q 曲線

(1) 原点を通らない直線型 p - q 曲線

Fig. 6 (h) に示すように、得られた p , q には直線関係があるが、その直線が原点を通らない場合がある。この型の p - q 曲線の主な発生原因は、ルジオンテストにおいて、「通常毎朝作業開始前の試験孔内水位を測定し、この水位を試験時の地下水位とみなす」¹⁾ ことによる誤差であると考えられる。つまり、宙水や被圧地下水などの存在により、地盤内の地下水圧分布が静水圧分布に従わない場合には、上記の方法により正確な地下水圧を知ることはできないということである。

対策としては、試験結果の数がある程度出そろった時点で地下水位分布の洗い直しを行うか、前述したように

試験区間内に間隙水圧計を設置して、地下水位ではなく地下水圧を試験前に直接とらえること等が挙げられる。

また、この p - q 曲線を逐次流量減少型の p - q 曲線と見誤る可能性がある¹⁾ので十分な注意が必要である。

(2) 2段勾配 p - q 曲線

Fig. 6 (i) に示すような2段勾配 p - q 曲線の発生原因としては、試験孔の水洗い不足やある圧力以上での亀裂の開口等が考えられる。しかし、発生原因により初期直線からルジオン値を求めるべき(亀裂の開口)か、折れ曲がり後の直線部分から求めるべき(水洗い不足)かが異なるので、試験時の水洗い状況や地盤状況を総合的に判断してルジオン値を決定すべきである。

(3) 緩勾配 p - q 曲線

一口に緩勾配といっても、それを定義することは非常に困難である。よって、以下に示す原因により発生する p - q 曲線を緩勾配 p - q 曲線とよぶことにする (Fig. 6 (j) 参照)。

- ① 透水性の非常に大きい亀裂性岩盤における試験で、ポンプ容量が不足して有効注入圧力が上がりにくい場合。
- ② 亀裂の少ない軟岩や砂礫地盤のように限界圧力が小さい地盤に対する試験で、第一段階の水圧やポンプ脈動に伴う水圧変動が大きいため地盤が破壊され、その後の透水性を評価してしまう場合^{1), 4), 28), 29)}。

①に示すような地盤において正確にルジオン値を求めるためには、試験区間長を短くしたり、注入圧力を小さくすることにより注入量を低減さすか、前述した高粘性流体試験を実施することが望ましい。ただし、ポンプ容量を上げて、試験区間長や注入圧力を変化させないのは良策ではない。

②に示すような地盤において正確にルジオン値を求めるためには、脈動の小さいポンプを用いるか、ポンプに高容量のエアチャンバを取り付けるか、静水圧による载荷等を利用することにより、注入圧力を高精度に制御したうえで微増させてルジオンテストを実施するとともに、ピット孔等を利用した他の原位置透水試験を併せて実施してルジオンテストの結果を検討する^{4), 28), 29)}ことが望ましい。

9. まとめ

本論文においては、①ルジオンテストの結果求まる p - q 曲線をその形状により Fig. 6 に示すように分類し、②それらの発生原因を列挙し、③さらに発生原因の影響度を検討したうえで、④ダム基礎浸透流を支配する透水性を表わすルジオン値を求めるための対策を示した。すなわち、ルジオンテストに際しては、地下水圧測定や注入管抵抗による損失水頭の補正の精度を上げて有効注

入圧力を正確に把握し、かつ注入量の非正常現象、注水に伴う目詰り現象や地盤の変形、破壊に十分留意しながら注入量を測定したうえで p - q 曲線を描き、最終的には試験区間が地下水面上にあるか下にあるか、あるいは注入した水の流れが層流か乱流であるかを分析してルジオン値を決定することが望まれる。

実際の現場試験において得られる p - q 曲線には、本論文で示した以外の形状をもつものを見掛けることもある。こうした p - q 曲線は、本論文で示した各形状の p - q 曲線の発生原因の複数が作用することにより発生するものとする。よって、そのような p - q 曲線が発生する場合でも、本論文で示した各種 p - q 曲線の発生原因の影響度を考慮したうえで、各種対策を施すことにより、かなり正確にルジオン値を求めることができるものとする。

謝 辞：本研究を遂行するにあたり、株式会社間組の弘末文紀氏には飽和不飽和浸透流解析について、また日特建設株式会社の渋市秀雄氏には高粘性流体試験について多大なるご協力を賜った。末筆ながら記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説，(財)国土開発技術センター，1984年6月。
- 2) 菅原利夫：軟岩の透水性把握に関する問題，土と基礎，Vol. 35, No. 4, pp. 23~29, 1987年4月。
- 3) Lugeon, M. : Barrages et géologie, Dunod, Paris, 1933.
- 4) 松本徳久・山口嘉一：地下深部の軟岩地盤に対するルジオンテスト，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，岩の力学連合会等，pp. 223~228, 1987年12月。
- 5) 松本徳久・山口嘉一・弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈，建設省土木研究所資料，第2518号，pp. 4~7, 1987年11月。
- 6) 赤井浩一・大西有三・西垣 誠：有限要素法による飽和不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，第264号，pp. 87~96, 1977年8月。
- 7) 松本徳久・山口嘉一：異方性地盤における原位置透水試験方法に関する研究，建設省土木研究所資料，第2373号，pp. 19~21, 1986年5月。
- 8) Irmay, S. : On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 35 (3), pp. 463~467, 1954.
- 9) 末吉治彦，ほか：節理性岩盤における乱流状況と透水性評価，第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会岩盤力学委員会，pp. 356~360, 1986年2月。
- 10) 前掲5)，pp. 88~96。
- 11) Kutzner, C. : Considerations on rock permeability and grouting criteria, Proceedings of the 15th Congress on Large Dams, Question 58, pp. 315~328, 1985.
- 12) Ewert, F. K. : Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites, Springer-Verlag, 1985.
- 13) Houlby, A. C. : Routine interpretation of the Lugeon water-test, Journal of Engineering Geology, Vol. 9, pp. 303~313, 1976.
- 14) Lancaster-Jones, P. F. F. : The interpretation of the Lugeon water-test, Journal of Engineering Geology, Vol. 8, pp. 151~154, 1975.
- 15) 渡辺邦夫・芦川亮一：割れ目岩盤の透水試験における乱流の影響評価の試み，第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会岩盤力学委員会，pp. 161~165, 1985年2月。
- 16) 松本徳久・山口嘉一・渋市秀雄：高粘性流体を用いた透水試験，第23回土質工学研究発表会講演集，pp. 125~126, 1988年6月。
- 17) 前掲5)，pp. 104~106。
- 18) 播田一雄・豊田光雄：水圧計を利用したルジオンテストにおける一考案，建設省土木研究所資料，第1570号，1980年3月。
- 19) 桑原啓三：ルジオンテスト施工指針(案)の検討，建設省土木研究所資料，第1907号，pp. 11~19, 1983年3月。
- 20) Stephens, D. B. and Neuman, S. P. : Free surface and saturated-unsaturated analyses of borehole infiltration tests above the water table, 3rd International Conference on F. E. in Water Resources, Univ. of Mississippi, Oxford, pp. 2229~2238, 1980.
- 21) Philip, J. R. : Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil, Water Resources Research, Vol. 21, No. 7, pp. 1025~1033, 1985.
- 22) 松本徳久・山口嘉一：風化岩基礎における原位置透水試験の適用性について，原位置透水試験法および地下水調査に関する発表論文集，pp. 65~70, 1985年12月。
- 23) 振井茂宏，ほか：第四紀砂礫層におけるグラウト効果の評価について，第40回建設省技術研究会講演概要，自由課題，河川部門，pp. 13~20, 1986年10月。
- 24) 中村康夫：ボーリングに伴う情報一水の情報一，建設省土木研究所資料，第2221号，pp. 99~112, 1985年3月。
- 25) 西垣 誠：単孔式透水試験の問題点の対策と改良，地下水と井戸とポンプ，Vol. 28, No. 9, pp. 1~10, 1986年9月。
- 26) 向上拡美・北村孝海：浸透流における不飽和特性と解析精度に関する考察，間組研究年報，pp. 163~174, 1986年。
- 27) 西垣 誠・楠見和紀：不飽和土の透水特性の推定法，第22回土質工学発表会講演集，pp. 1555~1556, 1987年6月。
- 28) 松本徳久・山口嘉一：軟岩基礎の原位置透水試験方法に関する研究，第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会岩盤力学委員会，pp. 201~205, 1985年2月。
- 29) 松本徳久・山口嘉一：軟岩基礎の原位置透水試験方法に関する考察，土木技術資料，Vol. 27, No. 10, pp. 3~8, 1985年10月。